

李浩龙, 周 蓉, 蒋芳玲, 等. 醋栗番茄 LA2093 渐渗系群体苗期耐盐性评价[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1620-1626.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.06.021

醋栗番茄 LA2093 渐渗系群体苗期耐盐性评价

李浩龙, 周 蓉, 蒋芳玲, 文军琴, 刘 帅, 吴 震

(南京农业大学园艺学院/农业农村部华东地区园艺作物生物学与种质创新重点实验室, 江苏 南京 210095)

摘要: 以栽培番茄(*Solanum lycopersicum*) Jina 为母本, 醋栗番茄(*Solanum pimpinellifolium*) LA2093 为父本, 构建渐渗系(introgression line, IL) BC₃F₃ 代群体。以该群体的 19 个渐渗系株系及亲本为试验材料, 调查盐胁迫(200 mmol/L NaCl)处理下番茄苗期基于 7 个指标(株高、茎粗、整株鲜质量、整株干质量、叶绿素相对含量、丙二醛含量和过氧化氢含量)的耐盐性系数。通过对各指标对应的耐盐性系数进行相关性分析、主成分分析和隶属函数分析, 综合评价各番茄材料的耐盐性。对各番茄材料的耐盐性综合评价值(D)进行聚类分析, 筛选出 3 个耐盐株系(IL-6、IL-9 和 IL-12); 通过逐步回归分析建立番茄苗期耐盐性预测方程: $D = 1.155\alpha_2 + 0.576\alpha_3 + 0.525\alpha_6^{-1} + 0.341\alpha_7^{-1} - 1.582$, 并筛选出茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量作为番茄苗期耐盐性评价指标。通过测定番茄幼苗的茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量, 进而分析相应的耐盐系数, 可以对番茄耐盐性进行预测。

关键词: 番茄; 苗期; 耐盐性; 渐渗系; 综合评价

中图分类号: S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)06-1620-07

Evaluation of salt tolerance of introgression line population of *Solanum pimpinellifolium* LA2093 at seedling stage

LI Hao-long, ZHOU Rong, JJANG Fang-ling, WEN Jun-qin, LIU Shuai, WU Zhen

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Biology and Germplasm Innovation of Horticultural Crops in East China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210095, China)

Abstract: BC₃F₃ population of introgression line (IL) was constructed with cultivar tomato Jina (*Solanum lycopersicum*) as female parent and wild tomato LA2093 (*Solanum pimpinellifolium*) as male parent. By using 19 individual plants from BC₃F₃ ILs and their parents as experimental materials, salt tolerance coefficients derived from seven indexes (plant height, stem diameter, plant fresh weight, plant dry weight, relative chlorophyll content, malondialdehyde content and hydrogen peroxide content) of tomato seedling under salt stress (200 mmol/L NaCl) were investigated. The salt tolerance coefficients of each index were used to do correlation analysis, principal component analysis and affiliation function analysis to comprehensively evaluate the salt tolerance of each tomato material. Cluster analysis was performed on the comprehensive salt tolerance evaluation value (D) of each material, and three salt-tolerant strains (IL-6, IL-9 and IL-12) were selected. The salt tolerance prediction equation was established by stepwise regression analysis: $D = 1.155\alpha_2 + 0.576\alpha_3 + 0.525\alpha_6^{-1} +$

$0.341\alpha_7^{-1} - 1.582$, and stem diameter, plant fresh weight, malondialdehyde content and hydrogen peroxide content were selected as the evaluation indexes of salt tolerance for tomato seedlings. Salt tolerance of tomato seedling can be predicted by measuring stem diameter, plant fresh weight, malondialdehyde content and hydrogen peroxide content and analyzing their related salt tolerance coefficients.

Key words: tomato; seedling stage; salt tolerance; introgression line; comprehensive evaluation

收稿日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1903106); 中央高校基本科研业务费项目(KYZZ2021004); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

作者简介: 李浩龙(1996-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事番茄种植资源创新研究。(E-mail) 2019104069@stu.njau.edu.cn

通讯作者: 吴 震, (E-mail) wzh@njau.edu.cn

普通栽培番茄大多属于中度盐敏感作物,为番茄耐盐品种选育所提供的材料十分有限。但野生番茄资源含有许多潜在的耐盐基因,可以为番茄耐盐品种的选育提供优异变异来源^[1-2]。目前,研究者在潘那利番茄(*Solanum pennellii*)等野生番茄资源中均已鉴定出丰富的耐盐片段^[3-7]。近几十年来,野生番茄资源中的耐盐基因被育种学家广泛应用于栽培番茄的遗传改良研究中^[8-11]。野生番茄中醋栗番茄与栽培番茄的亲缘关系最近,醋栗番茄内的耐盐基因通过杂交的手段更易转移到栽培番茄中。渐渗系(Introgression line, IL)群体是通过两亲本不断回交和自交构建而成的,群体内各株系基因组与受体亲本大致相同,仅有一小部分被供体亲本基因组所代替。通过构建醋栗番茄 IL 群体并筛选耐盐株系,对挖掘醋栗番茄中优异耐盐基因具有重要意义。

随着番茄的生长发育,对盐胁迫的敏感程度逐渐降低,苗期是对盐胁迫最敏感的时期之一^[12]。番茄的耐盐性属于多基因控制的性状,单指标难以准确地反映番茄的耐盐性。近年来,基于多指标对植物耐盐性进行综合评价的方法已在各种作物中广泛应用^[13-16]。前人在研究中发现,醋栗番茄(*Solanum pimpinellifolium*) LA2093 对盐胁迫不敏感,属于耐盐番茄种植资源^[17]。因此,本研究以耐盐醋栗番茄 LA2093 渐渗系(IL)BC₃F₃代群体(共 19 个渐渗系株系)及亲本为试验材料,在幼苗期对各番茄材料的耐盐相关指标进行测定并计算耐盐性系数,然后利用多元分析方法综合评价番茄各株系耐盐性,筛选出耐盐株系,并获得有效评价番茄苗期耐盐性的重要指标。本研究结果可为耐盐番茄品种的鉴定和选育提供理论参考,也可为后续醋栗番茄中耐盐关键基因的挖掘奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以 19 个醋栗番茄单片段渐渗系株系及渐渗系群体亲本为试验材料(表 1)。19 个单片段渐渗系株系从南京农业大学蔬菜生理生态实验室通过 3 代回交和 2 代自交构建的 BC₃F₃代渐渗系群体中选出,以栽培番茄(*Solanum lycopersicum*) Jina 为母本,醋栗番茄(*Solanum pimpinellifolium*) LA2093 为父本,其渗入片段覆盖野生番茄全基因组的 65%左右。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 10 月至 11 月在南京农业大学

玻璃温室中进行,播种所用基质各成分含量比例为 2:1:1(草炭:蛭石:珍珠岩)。待番茄幼苗长至 2 叶 1 心期时,将长势相同的番茄幼苗移栽到 32 孔穴盘中,采用 1/2 日本园式营养液培养。待幼苗长至 5 叶 1 心时,以添加含有 200 mmol/L NaCl 的 1/2 日本园式营养液为处理组,以添加不含 NaCl 的 1/2 日本园式营养液为对照组。试验期间营养液每 2 d 更换 1 次,每次添加 5 L,添加前倒出穴盘中所有溶液,以保持渗透势稳定。每个处理 15 株,每 3 株为 1 个重复,共 5 个重复,数据取 5 个重复的平均值。

表 1 供试植株材料编号及渗入片段所在染色体编号
Table 1 Numbers of tested plant material and chromosome of introgression fragment

试验材料编号	渗入片段所在染色体编号	试验材料编号	渗入片段所在染色体编号
1(母本)		IL-12	6
2(父本)		IL-13	9
IL-3	12	IL-14	8
IL-4	4	IL-15	6
IL-5	2	IL-16	4
IL-6	11	IL-17	6
IL-7	2	IL-18	6
IL-8	7	IL-19	11
IL-9	6	IL-20	8
IL-10	12	IL-21	6
IL-11	10		

1.3 耐盐鉴定指标及测定方法

1.3.1 生长指标 在盐处理第 10 d,测量番茄幼苗的株高和茎粗。取出幼苗并用去离子水冲洗干净,吸干表面水分,称其鲜质量;然后将幼苗装入信封中,在烘箱中先杀青 10 min(105 ℃),然后烘 48 h(80 ℃)至恒质量取出,称其干质量。

1.3.2 叶绿素相对含量 在盐处理第 6 d,取自顶部向下数第 3 张完全展开的叶片,利用叶绿素仪(SPAD-502 Plus,日本)检测叶绿素相对含量。

1.3.3 丙二醛和过氧化氢含量 在盐处理第 6 d,取自顶部向下数第 3 张完全展开的叶片,丙二醛(MDA)含量和过氧化氢(H₂O₂)含量的测定方法参照李合生^[18]的方法。

1.4 数据统计与计算

用 SPSS 20.0 软件对数据进行多元分析(相关分析、主成分分析、聚类分析和逐步回归分析)。试验所用的计算公式如下:

单项指标耐盐性系数(α):

$$\alpha = \frac{\text{处理测定值}}{\text{对照测定值}} \quad (1)$$

7 个指标中基于 MDA 和 H_2O_2 含量的耐盐性系数越高代表越不耐盐,其余指标的耐盐性系数越高代表越耐盐。因此,在对各指标耐盐性系数进行多元分析时,将基于 MDA 和 H_2O_2 含量的耐盐性系数转化为倒数参与统计。

各综合指标隶属函数值:

$$\mu(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, X_i 表示第 i 个综合指标; X_{\min} 表示第 i 个综合指标的最小值; X_{\max} 表示第 i 个综合指标的最大值。综合指标由单项指标通过主成分分析提取得到。

各综合指标权重:

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中, W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度(权重); P_i 表示第 i 个综合指标的贡献率。

耐盐性综合评价值(D):

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \cdot W_i] \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 21 份番茄材料基于各指标的耐盐性系数及其相关性分析

由表 2 可知,供试材料基于株高的耐盐性系数(α_1)、基于茎粗的耐盐性系数(α_2)、基于整株鲜质量的耐盐性系数(α_3)、基于整株干质量的耐盐性系数(α_4)和基于叶绿素相对含量的耐盐性系数(α_5)与对照相比整体均有所下降($\alpha < 1$),而基于丙二醛含量的耐盐性系数(α_6)和基于过氧化氢含量的耐盐性系数(α_7)与之相反,均有所增加($\alpha > 1$)。1 号(母本)和 2 号(父本)相比,2 号番茄除基于丙二醛含量的耐盐性系数(α_6)、基于过氧化氢含量的耐盐性系数(α_7)低于母本以外,基于其余各指标的耐盐性系数均高于母本,且与其他 19 份渐渗系株系相比耐盐性系数较高,说明受盐胁迫影响较小,父本番茄中含有耐盐优异基因。此外还发现,19 份渐渗系株系的各个指标对盐胁迫响应程度并不相同,仅用单个指标难以直接确定各株系的耐盐性。

表 2 21 份番茄材料基于各单项指标的耐盐性系数

Table 2 Salt tolerance coefficient of 21 tomato materials based on single index

试验材料编号	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
1	0.81	0.89	0.75	0.75	0.79	1.60	2.03
2	0.94	0.96	0.81	1.03	1.00	1.07	1.32
IL-3	0.78	0.78	0.64	0.62	0.90	1.54	1.28
IL-4	0.72	0.94	0.76	0.80	0.80	1.74	1.33
IL-5	0.70	0.87	0.65	0.67	0.84	1.56	4.79
IL-6	0.77	0.98	0.80	1.00	0.97	1.07	1.28
IL-7	0.65	0.87	0.54	0.63	0.92	2.14	1.57
IL-8	0.83	0.92	0.80	0.81	0.87	1.83	1.73
IL-9	0.91	0.95	0.83	0.90	0.91	1.56	1.09
IL-10	0.72	0.88	0.62	0.55	0.83	1.41	1.76
IL-11	0.74	0.83	0.60	0.54	0.77	1.38	1.44
IL-12	0.84	1.00	0.80	0.80	0.96	1.10	1.22
IL-13	0.77	0.90	0.62	0.65	0.86	1.82	2.53
IL-14	0.68	0.95	0.56	0.68	0.75	1.60	1.48
IL-15	0.77	0.95	0.60	0.43	0.86	1.58	1.06
IL-16	0.72	0.87	0.49	0.50	0.77	1.66	1.48
IL-17	0.71	0.87	0.62	0.62	0.79	1.64	1.40
IL-18	0.67	0.88	0.59	0.67	0.84	2.13	2.68
IL-19	0.73	0.86	0.53	0.61	0.88	1.49	1.58
IL-20	0.67	0.92	0.57	0.58	0.87	2.28	3.33
IL-21	0.75	0.91	0.72	0.73	0.91	1.61	2.80

α_1 : 基于株高的耐盐性系数; α_2 : 基于茎粗的耐盐性系数; α_3 : 基于整株鲜质量的耐盐性系数; α_4 : 基于整株干质量的耐盐性系数; α_5 : 基于叶绿素相对含量的耐盐性系数; α_6 : 基于丙二醛含量的耐盐性系数; α_7 : 基于过氧化氢含量的耐盐性系数。

由相关性分析结果(表3)可知,基于植株株高的耐盐性系数和基于整株鲜质量的耐盐性系数、基于整株干质量的耐盐性系数、基于丙二醛含量的耐盐性系数之间,基于茎粗的耐盐性系数和基于整株干质量的耐盐性系数、基于鲜质量的耐盐性系数之间,基于整株干质量的耐盐性系数和基于整株鲜质量的耐盐性系数之间,基于整株干质量的耐盐性系数和基于叶绿素相对含量的耐盐性系数之间存在极显著相关($P<0.01$);基于株高的耐盐性系数和基于叶绿素相对含量的耐盐性系数之间,基于整株鲜质

量的耐盐性系数和基于叶绿素相对含量的耐盐性系数、基于丙二醛含量的耐盐性系数之间存在显著相关($P<0.05$),其他指标间也存在或多或少的相关性。由上述相关性分析结果可知,利用不同指标表征番茄耐盐性时,各指标所代表的信息之间存在重叠,同时各指标所代表的番茄耐盐性程度也不一样,可能导致最终的分析结果出现偏差。因此,需要对测定指标进行降维处理,构建综合评价指标,才能更有效地评价番茄苗期耐盐性。

表3 21份番茄材料基于各单项指标耐盐性系数的相关系数矩阵
Table 3 Correlation coefficient matrix of salt tolerance coefficient of 21 tomato materials based on single index

指标	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
α_1	1.000						
α_2	0.399	1.000					
α_3	0.771 **	0.567 **	1.000				
α_4	0.634 **	0.571 **	0.846 **	1.000			
α_5	0.527 *	0.393	0.520 *	0.597 **	1.000		
α_6	-0.590 **	-0.301	-0.480 *	-0.429	-0.333	1.000	
α_7	-0.372	-0.171	-0.163	-0.138	-0.088	0.375	1.000

α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 、 α_7 见表2注。*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$)。

2.2 不同指标耐盐性系数的主成分分析及权重计算

由表3可知,基于丙二醛和过氧化氢含量的耐盐性系数与基于其他指标耐盐性系数呈负相关,为体现各指标效应的一致性,将基于丙二醛和过氧化氢含量的耐盐性系数(α_6 和 α_7)转化为倒数(α_6^{-1} 和 α_7^{-1})参与后续分析。通过主成分分析,共提取出4个主成分(表4),其贡献率分别为56.603%、14.721%、9.334%和7.912%,累计贡献率达到88.570%(大于85.00%),表明4个主成分能够代表全部单项指标的

大部分信息。因此,可以用这4个互相独立的综合指标来评价番茄苗期耐盐性。4个综合指标分别用 CI_1 、 CI_2 、 CI_3 和 CI_4 表示,其中 CI_1 中起重要作用的指标为基于株高、整株鲜质量和整株干质量的耐盐性系数; CI_2 中起重要作用的指标是基于过氧化氢含量的耐盐性系数; CI_3 中是基于茎粗的耐盐性系数起重要作用; CI_4 中是基于叶绿素相对含量的耐盐性系数起重要作用。根据公式(3)计算各综合指标的权重,分别为0.639、0.166、0.105和0.089。

表4 21份番茄材料苗期耐盐指标主成分分析及权重
Table 4 Principal component analysis and weight analysis of salt tolerance indexes of 21 tomato materials at seedling stage

综合指标	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6^{-1}	α_7^{-1}	贡献率 (%)	累计贡献率 (%)	权重
CI_1	0.846	0.680	0.885	0.865	0.714	0.748	0.429	56.603	56.603	0.639
CI_2	0.160	-0.167	-0.201	-0.307	-0.214	0.284	0.846	14.721	71.324	0.166
CI_3	-0.180	0.641	0.053	0.024	-0.412	-0.167	0.137	9.334	80.658	0.105
CI_4	-0.319	0.274	-0.336	-0.136	0.418	0.266	0.001	7.912	88.570	0.089

α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 、 α_7 见表2注。 CI_1 、 CI_2 、 CI_3 、 CI_4 为主成分分析的综合指标。

2.3 各番茄材料耐盐性评价

利用公式(2)计算各综合指标的隶属函数值,利用公式(3)计算各综合指标的权重,利用公式(4)计算获得各番茄材料的耐盐性综合评价值(D)(表

5)。通过比较发现,2号父本 D 值最大,为0.810,耐盐性最强;1号母本 D 值为0.340,耐盐性较弱。19份渐渗系株系的 D 值范围为0.161~0.762,其中IL-6号番茄 D 值最大,耐盐性最强;IL-18号番茄 D

值最小,耐盐性最弱。如图 1 所示,对各番茄材料 D 值进行聚类分析,将父本、母本及 19 份渐渗系株系分成 2 类,耐盐类(I): 2、IL-6、IL-9 和 IL-12;不耐盐类(II): 1、IL-3、IL-4、IL-5、IL-7、IL-8、IL-10、IL-11、IL-13、IL-14、IL-15、IL-16、IL-17、IL-18、IL-19、IL-20 和 IL-21。

2.4 耐盐指标的筛选和番茄苗期耐盐性预测

为明确显著影响番茄苗期耐盐性的主要指标,利用 SPSS 20.0 软件对耐盐性综合评价值进行逐步回归分析,建立最优回归线性方程: $D = 1.155\alpha_2 +$

$0.576\alpha_3 + 0.525\alpha_6^{-1} + 0.341\alpha_7^{-1} - 1.582$, 其中 α_2 、 α_3 、 α_6 和 α_7 分别代表茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量对应的耐盐性系数。由上述方程可知,茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量是对番茄苗期耐盐性影响最为显著的指标。为进一步检验最优回归方程的准确性,利用该方程对耐盐性预测值(P)进行计算,结果见表 5。将耐盐性综合评价值与相对应的预测值进行相关性分析,相关系数(R)= 0.985,呈极显著相关($P < 0.01$),表明该方程能够比较准确地预测番茄苗期耐盐性。

表 5 21 份番茄材料幼苗植株的综合指标、隶属函数值、综合评价值和预测值

Table 5 Comprehensive index, membership function value, comprehensive evaluation value and prediction value of 21 tomato seedlings

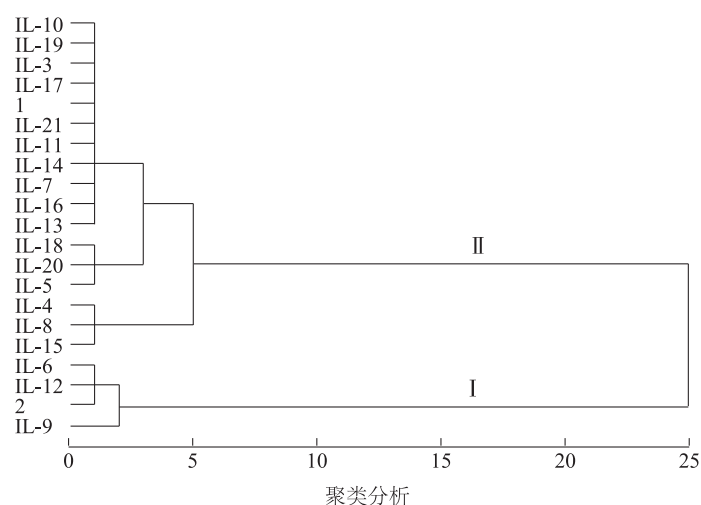
试验材料 编号	综合指标				隶属函数值				综合评价值 (D)	预测值 (P)
	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$		
1	0.087	-0.455	0.170	-1.982	0.349	0.330	0.584	0.000	0.340	0.374
2	2.315	0.035	-1.026	0.280	1.000	0.472	0.332	0.644	0.810	0.742
IL-3	-0.292	1.195	-2.604	-0.672	0.239	0.810	0.000	0.373	0.320	0.295
IL-4	0.189	0.041	1.730	-1.029	0.379	0.474	0.912	0.271	0.442	0.500
IL-5	-0.613	-1.580	-0.677	-0.046	0.145	0.003	0.406	0.551	0.185	0.205
IL-6	1.776	-0.109	0.237	1.532	0.843	0.430	0.598	1.000	0.762	0.768
IL-7	-0.834	-0.208	-0.520	1.294	0.081	0.401	0.439	0.932	0.248	0.196
IL-8	0.578	-0.756	0.240	-1.630	0.493	0.242	0.599	0.100	0.427	0.425
IL-9	1.509	0.567	0.389	-1.496	0.765	0.627	0.630	0.138	0.672	0.643
IL-10	-0.492	0.378	-0.269	0.391	0.181	0.572	0.491	0.675	0.323	0.358
IL-11	-0.721	1.366	-0.657	-0.701	0.114	0.859	0.410	0.365	0.291	0.339
IL-12	1.639	-0.084	0.338	1.309	0.803	0.438	0.619	0.937	0.735	0.743
IL-13	-0.380	-0.903	-0.205	-0.189	0.213	0.199	0.505	0.510	0.268	0.238
IL-14	-0.582	0.459	2.147	0.323	0.154	0.595	1.000	0.656	0.362	0.396
IL-15	-0.154	1.850	1.090	1.043	0.279	1.000	0.778	0.861	0.503	0.515
IL-16	-1.110	1.157	0.275	0.090	0.000	0.799	0.606	0.590	0.249	0.252
IL-17	-0.614	0.783	0.291	-0.519	0.145	0.690	0.609	0.416	0.309	0.344
IL-18	-0.934	-1.220	0.065	0.021	0.052	0.107	0.562	0.570	0.161	0.148
IL-19	-0.519	0.553	-1.036	0.956	0.173	0.623	0.330	0.836	0.323	0.285
IL-20	-0.976	-1.589	0.490	0.873	0.039	0.000	0.651	0.813	0.166	0.142
IL-21	0.126	-1.478	-0.466	0.155	0.361	0.032	0.450	0.608	0.338	0.332

3 讨论

3.1 番茄苗期耐盐性综合评价及指标的筛选

本研究中,盐胁迫下各番茄材料的株高、茎粗、整株鲜质量、整株干质量和叶绿素相对含量的耐盐

性系数与对照相比整体表现为降低趋势,而丙二醛和过氧化氢含量的耐盐性系数与对照相比均升高,且不同材料间各指标对应的耐盐性系数变化程度不同。对株高、茎粗、整株鲜质量、整株干质量、叶绿素相对含量、丙二醛含量和过氧化氢含量 7 项指标对

图1 不同番茄材料 *D* 值聚类分析结果Fig.1 *D*-value cluster analysis of different tomato materials

应的耐盐性系数相关性分析结果表明,各指标所代表的信息之间存在交叉重叠。因此,仅凭借单个指标无法全面反映番茄的耐盐性,需要提取综合指标来评价其耐盐性。耐盐性系数可以更加准确地反映植物的耐盐能力,目前,已有大量研究以耐盐性系数为基础,结合多元分析方法综合评价植株耐盐性^[19-24]。本研究以番茄苗期 7 个指标的耐盐性系数或耐盐性系数的倒数为基础,提取了 4 个独立的综合指标,通过对 4 个综合指标进行隶属函数分析并求出各番茄材料的耐盐性综合评价值。由于耐盐性综合评价值是 0~1 的纯数^[25],故可以更加科学、直观地比较各番茄材料的耐盐性。通过对 *D* 值聚类分析,较为客观地将 19 份渐渗系株系分成耐盐类和不耐盐类,其中不耐盐类渐渗系株系有 16 份,耐盐类渐渗系株系有 3 份。

目前,番茄耐盐性评价指标并没有统一的标准,但有相关研究结果表明,在盐胁迫下,番茄的株高和茎粗与对照相比差异显著,并将其作为番茄耐盐性评价指标^[26];盐胁迫下丙二醛含量与番茄耐盐性呈极显著负相关,可以作为番茄耐盐性评价指标^[27-28]。董志刚等^[29]在番茄苗期耐盐性鉴定中将植株鲜质量、根冠比和壮苗指数作为苗期耐盐性评价指标。本研究利用逐步回归分析,建立了番茄苗期耐盐性预测方程: $D = 1.155\alpha_2 + 0.576\alpha_3 + 0.525\alpha_6^{-1} + 0.341\alpha_7^{-1} - 1.582$,确定对番茄苗期耐盐性影响最为显著的 4 个指标分别为茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量对应的耐盐性系数。与

已报道的番茄苗期耐盐性评价指标相比,本研究增加了过氧化氢含量对应的耐盐性系数作为评价指标。在相同试验条件下,通过测定番茄幼苗的茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量 4 个指标,并利用上述方程可以更加方便、快速地对番茄耐盐性进行预测。

3.2 耐盐株系的利用

本研究通过对醋栗番茄渐渗系株系进行耐盐性评价,初步筛选出 3 个耐盐渐渗系株系,分别为 IL-6、IL-9 和 IL-12,其中 IL-6 耐盐性最强。3 个耐盐株系的染色体一小部分被父本醋栗番茄所替代,而其余染色体与母本栽培番茄 Jina 相同。其中 IL-9 和 IL-12 株系均含有醋栗番茄第 6 号染色体部分片段,IL-6 含有醋栗番茄第 11 号染色体部分片段。本研究结果表明,母本为不耐盐番茄,而父本为耐盐番茄,耐盐株系的耐盐性与其所携带的父本染色体渗入片段有关。后期可通过耐盐株系与轮回母本 Jina 进一步杂交并自交多代,构建各自耐盐系亚系群体。利用已公布的醋栗番茄 LA2093 基因组数据^[30],进一步开发分子标记对耐盐亚系群体进行基因分型并结合耐盐性鉴定,挖掘耐盐关键基因。利用耐盐渐渗系株系挖掘耐盐基因已有相关报道,例如余庆辉等^[9]利用耐盐渐渗系株系 IL7-5,通过加密分子标记构建该片段遗传连锁图谱并进行耐盐鉴定,实现了 *Stq7b* 耐盐的主效位点精细定位,并筛选出 2 个耐盐候选基因;周龙溪^[8]同样以耐盐渐渗系 IL7-5 与 M82 为亲本

构建了 IL7-5 Sub-ILs 渐渗系亚系群体,通过对亚系群体进行耐盐性鉴定,最终发现苗期耐盐主效 QTL *Stq7* 位点和 6 个耐盐候选基因。

4 结 论

本研究利用以醋栗番茄 (*S. pimpinellifolium*) LA2093 为遗传材料的渐渗系群体筛选出 3 个耐盐株系,为培育番茄耐盐品种提供材料,也为后续醋栗番茄中耐盐关键基因的挖掘提供参考^[31]。建立了番茄苗期耐盐性预测方程: $D = 1.155\alpha_2 + 0.576\alpha_3 + 0.525\alpha_6^{-1} + 0.341\alpha_7^{-1} - 1.582$,并将茎粗、整株鲜质量、丙二醛含量和过氧化氢含量作为番茄苗期耐盐性评价指标,为耐盐番茄品种的鉴定和选育提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 郑艳红,刘仲齐,金凤媚,等. 番茄耐盐性研究进展[J]. 天津农业科学, 2006(2): 20-23.
- [2] FOOLAD M R, LIN G Y. Absence of a genetic relationship between salt tolerance during seed germination and vegetative growth in tomato[J]. Plant Breeding, 1997, 116(4): 363-367.
- [3] 黄秋凤. 番茄渐渗系 IL9-1 耐旱基因的定位和候选[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [4] ASINS M J, VILLALTA I, ALY M M, et al. Two closely linked tomato HKT coding genes are positional candidates for the major tomato QTL involved in Na^+/K^+ homeostasis[J]. Plant, Cell & Environment, 2013, 36(6): 1171-1191.
- [5] FOOLAD M R, LIN G Y. Genetic potential for salt tolerance during germination in *Lycopersicon* species[J]. Hort Science, 1997, 32(2): 296-300.
- [6] FOOLAD M R. Genetic basis of physiological traits related to salt tolerance in tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill[J]. Plant Breeding, 1997, 116(1): 53-58.
- [7] TAL M, SHANNON M C. Salt Tolerance in the wild relatives of the cultivated tomato: responses of *Lycopersicon esculentum*, *L. cheesmanii*, *L. peruvianum*, *Solanum pennellii* and F_1 hybrids to high salinity[J]. Functional Plant Biology, 1983, 10(1): 109-117.
- [8] 周龙溪. 野生种番茄 *Solanum pennellii* 苗期耐盐主效 QTL 的精细定位[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [9] 余庆辉,刘 磊,王柏柯,等. 利用 *Solanum pennellii* LA716 渐渗系群体对番茄苗期耐盐 QTLs 进行定位及 QTL 效应的初步分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(4): 761-768.
- [10] 刘希艳. 醋栗番茄 (*Solanum pimpinellifolium*) RIL 群体苗期耐盐耐旱 QTL 定位[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [11] 潘 颖,王孝宣,杜永臣,等. 利用高代回交群体定位野生醋栗番茄发芽期耐盐 QTL[J]. 园艺学报, 2010, 37(1): 39-46.
- [12] LI J M, LIU L, BAI Y L, et al. Seedling salt tolerance in tomato [J]. Euphytica, 2011, 178(3): 403-414.
- [13] CHOUDHARY A, KAUR N, SHARMA A, et al. Evaluation and screening of elite wheat germplasm for salinity stress at the seedling phase[J]. Physiol Plant, 2021, 173(4): 2207-2215.
- [14] 刘彤彤,李 宁,魏良迪,等. 山西省主推小麦品种芽期及苗期耐盐性的综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 22-33.
- [15] 戴海芳,武 辉,阿曼古丽·买买提阿力,等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1290-1300.
- [16] 杨 涛,李生梅,黄雅婕,等. 海岛棉资源自然复合盐胁迫综合评价[J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1507-1521.
- [17] 岑本建. 外源褪黑素缓解番茄盐胁迫的机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 张则宇,李 雪,王 焱,等. 59 份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112-121.
- [20] 张 瑞,王 洋, SHAHID H,等. 水培条件下水稻全生育期耐盐筛选鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1567-1581.
- [21] 田小霞,毛培春,郑明利,等. 白花草木樨种质苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价[J]. 中国草地学报, 2019, 41(6): 7-14.
- [22] 刘彤彤,李 宁,魏良迪,等. 山西省主推小麦品种芽期及苗期耐盐性的综合评价[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(2): 22-33.
- [23] 张自强,白 晨,张惠忠,等. 甜菜种质资源苗期耐盐性评价及筛选[J]. 中国农学通报, 2020, 36(13): 23-28.
- [24] 陈 新,张宗文,吴 斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2038-2046.
- [25] 高三基,罗 俊,陈如凯,等. 甘蔗品种抗旱性光合生理指标及其综合评价[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 94-98.
- [26] 陈建林,吴雪霞,朱为民. NaCl 胁迫下不同番茄品种幼苗耐盐性研究[J]. 上海农业学报, 2008(3): 80-83.
- [27] 杨凤军,高 凤,韩 昱,等. 不同基因型番茄幼苗期耐盐性分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(4): 12-17.
- [28] 许立志,庞胜群,刁 明,等. 隶属函数法评价不同加工番茄品种耐盐性[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(5): 833-842.
- [29] 董志刚,程智慧. 番茄品种资源芽期和幼苗期的耐盐性及耐盐指标评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1348-1355.
- [30] SU X, WANG B, GENG X, et al. A high-continuity and annotated tomato reference genome[J]. BMC Genomics, 2021, 22(1): 1-12.
- [31] 史建磊,熊自立,苏世闻,等. 栽培番茄与野生番茄 NBS-LRR 类抗病基因家族的全基因组鉴定及表达分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1158-1166.

(责任编辑:陈海霞)